doi:10.13866/j.azr.2018.06.19

巴音布鲁克地区植物物候时空动态变化及其驱动分析①

高 庆[1,2]， 艾里西尔·库尔班[1]， 肖 昊[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：植物物候是反映气候变化最显著、直观的指标，对理解气候变化与植物物候的相互作用具有重要的意义。而不同的生态系统对气候变化的响应和反馈存在差异，科学分析气候变化趋势下多种生态系统植物物候变化特征及其驱动因子对理解植物物候变化机制具有重要意义。本文选取多种生态系统交错分布的巴音布鲁克为研究区域，基于 MODIS NDVI 时间序列，得到了研究区物候的空间格局特征、时空变化特征以及与海拔和气候因子之间的关系。结果表明：① 研究区植被返青期主要于 4 月上旬至 5 月下旬，枯黄期主要于 9 月中旬至 10 月中旬；② 2001—2017 年，研究区植物返青期总体上呈提前趋势，其中草原、草甸和沼泽提前显著。枯黄期在北部呈提前趋势，在南部呈推迟趋势，其中高山植被和草原枯黄期提前显著；③ 植被的返青期总体上随着海拔的升高而推迟，枯黄期总体上随着海拔的升高而提前，各生态系统植被间的物候期差异随着海拔的升高而缩短。④ 研究区植物返青期与春季气温呈显著负相关，其中高山植被受 5 月气温影响较大，草原和沼泽受 4 月气温影响较大，草甸受 4 月和 5 月气温影响较大。

关键词：植物物候；NDVI；空间格局；气候变化；巴音布鲁克；新疆

物候是指动植物发育或生活周期随季节变化的自然现象，其中植物的物候主要指植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等现象[1]。物候的研究不仅可以服务于农牧业的生产、灾害的预防、育种的选择，还可以作为气候变化和环境变化研究的重要指标[2-7]。目前，植物物候的检测方法主要有地面观测法、遥感监测法、模型模拟法三大类[8-10]。遥感监测法大多是通过多个时间点的植被指数构建其时间序列，并重建时间序列，用重建后的时间序列提取植被的物候信息[11-19]。由于遥感监测法可以进行大面积的物候监测，在大尺度上反映区域的植物物候状况，因此，该方法近年来得到了广泛的应用。

许多学者对中国多个区域的植物物候期进行了研究，认为在全球变暖的大背景下，植被发生了显著的变化[20-22]，中国植被的返青期总体上呈现提前趋势，植被的枯黄期总体呈现推迟趋势[11,16-19]。研究还表明，植物物候的变化主要受气温的影响，因此，气温是驱动物候变化的最重要因素。但是这些研究区域基本位于中国东部及北部，新疆区域的物候研究相对较少，如马勇刚等基于 AVHRR GIMMS NDVI 时间序列对整个中亚地区的植物物候进行了研究[16]，研究发现，中亚区域植被的物候期变化空间差异明显，各种植被类型的物候期变化明显不同。何宝忠等利用 MODIS MOD13A1 数据，得出了全疆植被的物候变化，结果表明植被的物候空间分布与海拔密切相关，植物物候的变化主要受到气温和降水的影响[23]。这些研究都是从宏观上对整个新疆的植物物候期变化进行了研究，对新疆高寒草地物候变化及其对气候变化响应精细分析的研究尚少。

我国拥有包括荒草地在内的各类天然草原近 4×10^8 hm^2，占国土面积的 41.7%[24]。草地是我国面积最大的绿色生态屏障，与森林一起构成我国陆地生态系统的主体。草地不仅是我国主要的自然资源，还是维护陆地生态系统的天然屏障。草地作为地球的“皮肤”，在防风固沙、涵养水源、保持水土、净化空气以及维护生物多样性等方面具有十分重要的作用[25-26]。巴音布鲁克地区是我国第二大草地和第一大高山草地，也是新疆最重要的牧场之一。

① **收稿日期：**2018-01-24； **修订日期：**2018-03-16

基金项目：国家重点研发计划（2017YFB0504204）；国家自然科学基金（31570536）

作者简介：高庆（1989-），男，在读硕士研究生．主要从事遥感应用研究．E-mail：gaoqing215@mails.ucas.ac.cn

通讯作者：艾里西尔·库尔班．E-mail：alishir@ms.xjb.ac.cn

由于其具有巨大的生态价值和经济价值,该区域植被的变化一直被广泛关注。物候期作为植被的重要指标之一,物候的变化研究具有重要意义。本文基于 NDVI 时间序列,提取巴音布鲁克地区植被的返青期(SOS)、枯黄期(EOS)及生长季长度(LOS),探索研究区植物物候的时空变化特征,结合气候因子(气温和降水),分析其与植物物候变化的关系。

1　研究区概况

研究区位于新疆巴音郭楞蒙古自治州和静县西北的巴音布鲁克草原,其地理位置为 82.979°～86.176°E,42.276°～43.332°N,包括巴音布鲁克草原最主要的大尤鲁都斯和小尤鲁都斯两个盆地以及主要的山脉(图 1)。其海拔为 1 780～4 413 m,主要分布着沼泽、草原、草甸、针叶林、高山植被,其中沼泽、草原和草甸的面积占 87% 以上。巴音布鲁克草原冬季严寒漫长,夏季温和短暂。研究区年平均气温 -4.5 ℃,4—9 月的平均气温在 5～10 ℃,全年无霜期不足 30 d[27]。

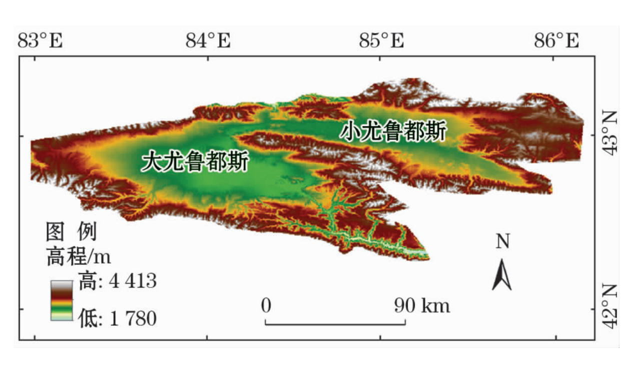


图 1　研究区示意图

Fig. 1　The study area

2　研究方法

2.1　数据来源与处理

本文主要采用遥感数据、植被类型数据、高程数据和气象数据,数据信息如表 1 所示。提取 MODIS MOD 09A1 的 B1(620～670 nm)波段和 B2(841～876 nm)波段数据,将其转换为栅格数据,并对栅格数据镶嵌,将其坐标转换到 GCS_WGS_1984 坐标系下,根据研究区范围裁剪出所需数据,计算 NDVI。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \qquad (1)$$

表 1　数据信息表

Tab. 1　The data information

数据类型	数据名称	数据来源
遥感数据	2001—2017 年 MODIS MOD09A1 数据	MODIS 来源于美国地质勘探局(http://glovis. usgs. gov)
植被类型数据	中国 1∶1 000 000 植被数据集	中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc. westgis. ac. cn)
高程数据	GDEMDEM 30 m 分辨率数字高程数据	地理空间数据云(http://www. gscloud. cn/)
气象数据	中国地面气温月值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)和中国地面降水月值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)	国家气象数据共享平台(http://data. cma. cn)

式中:NIR 为近红外反射率;为红波段反射率。对于 MODIS 09A1 数据,NIR 、R 分别为 B2 和 B1 波段的反射率。将 NDVI 按时间进行排列,组成 NDVI 时间序列。

将植被类型数据、高程数据和气象数据转换到 GCS_WGS_1984 坐标系,重采样到 250 m 分辨率,并根据研究区区域进行裁剪,使其与 NDVI 数据的空间位置和空间分辨率一致。

2.2　云和雪的识别

云和雪会使 NDVI 降低,在用 NDVI 时间序列研究植被的变化过程时,由于云和雪的存在,往往会出现一些突变点,给植被变化过程的描述带来了极大的干扰。因此需对云和雪进行识别,剔除有云影响的 NDVI,将有雪影响的 NDVI 置为 0。雪的识别通过 MODIS 09A1 的 State_1km_1 数据层的第 12 个字节,若该字节为 1,表示该像元有雪,若该字节为 0 表示该像元无雪。云的识别是基于云与其他地物在 B3(459～479 nm)波段的反射率存在明显的差异,通过阈值法将有云影响的 NDVI 识别出,其具体过程见文献[28]。

2.3　Savitzky-Golay 滤波法

通过对比试验,本文选用 Savitzky-Golay 滤波法作为时间序列重建的方法。Savitzky-Golay 滤波法是一种基于最小二乘的卷积算法,在设定的窗口内对时间序列数据进行多项式拟合,获得重建时间序列的方法。其实质为一个加权平均和,即给设定范围内的值不同权重,此点的值为该点的加权平均和。Savitzky-Golay 滤波可用式(2)表示[29]。

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} c_i Y_{j+i}}{N} \quad (2)$$

式中：Y_j 是时间序列中第 j 个数据的原始值；Y_j^* 是时间序列平滑后第 j 数据值；c_i 是平滑窗口内第 i 个数据的权重值；N 是设定的滤波窗口的大小，其值为（$2m+1$）。Savitzky-Golay 滤波需要设置两个参数，一个是与窗口大小有关的 N，另一个是拟合多项式的阶数 d。

本文先对时间序列用线性差值，将时间序列插值到每日数据，用 Savitzky-Golay 滤波对时间序列进行重建，经反复试验，将 N 设置为 57，d 设置为 3 最合适。

2.4 植被的物候提取方法

多年来许多学者利用植被指数时序数据研究了监测植物物候的方法，主要包括固定阈值法、动态阈值法、导数法、滑动平均法[12,30-32]。固定阈值法不能应用于具有不同土地覆盖类型和土壤背景的区域。导数法受噪音影响较大，且需要植被时间序列有明显的突升和突降。滑动平均法在有融雪的区域不适用。动态阈值法不仅克服了固定阈值法的不足，且抗噪音能力强。巴音布鲁克草原植被有多种类型，且春季有融雪现象，因此，本研究采用动态阈值法提取植被的物候期。动态阈值法是先计算每个时间点 NDVI 的变化幅度与总的变化幅度的比值。计算公式如式(3)。

$$NDVI_{ration} = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (3)$$

其中：$NDVI_{min}$ 为时间序列中的最小值，$NDVI_{max}$ 为时间序列中的最大值。根据巴音布鲁克草原生态站提供的观测数据，将前半部分曲线 $NDVI_{ration}$ 达到 0.4 的时间设置为生长季开始时间（SOS），后半部分曲线 $NDVI_{ration}$ 达到 0.6 的时间设置为生长季结束的时间（EOS），生长季长度（LOS）为 EOS－SOS。

2.5 趋势分析

为了研究本研究区植被的物候变化趋势，本文对每个像元多年的返青期和枯黄期数据进行最小二乘法线性拟合得到相应的线性方程，用方程的斜率来反应植被的变化趋势，方程的计算公式为：

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(NDVI_i - u)}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x)^2} \quad (4)$$

式中：x 为时间序列；u 为 NDVI 的平均值。当 k 大于 0 时，表示物候期有推迟趋势，当 k 小于 0 时，表示物候期有提前趋势。

3 结果分析

3.1 空间格局特征

利用时间序列提取生长季 NDVI 最大值、返青期（SOS）、枯黄期（EOS）和生长季长度（LOS）。由图 2a 可以看出，研究区植被整体覆盖较好，91% 的区域 NDVI 达到了 0.2 以上，NDVI 的平均值达到了 0.57。草甸和沼泽的植被覆盖度较大，草原次之，高山植被覆盖度较低，每种植被的 NDVI 大体上随着高程的增加而减小。从图 2b～2d 可知，研究区的植物物候期差异明显。在大尤鲁都斯和小尤鲁都斯两个盆地内，植被的返青期主要在 4 月上旬至 5 月下旬。草原和草甸 4 月上旬至 5 月上旬逐渐进入返青期，沼泽 5 月中下旬进入返青期。在山地区域，植被的返青期基本在 5 月下旬及 5 月以后的月份，且在该区域，草甸、高山植被、草原的返青期差异较小。研究区植被的枯黄期总体在 9 月中旬至 10 月中旬，只有小尤鲁都斯草原在 10 月中旬后进入枯黄期。草原进入枯黄期的时间较晚，除小尤鲁都斯盆地的部分草原，其他区域的草原 9 月下旬至 10 月上旬逐渐枯黄。草甸和沼泽基本在 9 月底前进入枯黄期，高山植被 9 月中旬前进入枯黄期。研究区植物生长季长度主要介于 100～180 d，只有小尤鲁都斯的部分草原生长季长度可达 180 d 以上。在大尤鲁都斯和小尤鲁都斯两个盆地内，草原的生长季较长，基本在 160 d 以上，草甸和沼泽大都在 140～160 d。在山地区域，生长季长度基本小于 140 d，且草甸、高山植被、草原的生长季长度差异较小。

3.2 时空动态变化特征

分别计算 2001—2017 年返青期 SOS 和枯黄期 EOS 的变化趋势，结果如图 3 所示。2001—2017 年，研究区大部分植被的返青期呈提前趋势，只有少部分植被呈推迟趋势，其中提前显著的面积占 25.7%，推辞显著的面积占 4.8%。提前的区域主要是大尤鲁都斯的草甸和小尤鲁都斯的草原及部分草甸。推迟的区域主要是大尤鲁都斯和艾尔温根乌拉山相接的部分草原。2001—2017 年，研究区植被枯黄期的趋势存在明显的南北差异，在研究区北部，枯黄期呈提前趋势，其中提前显著的区域占

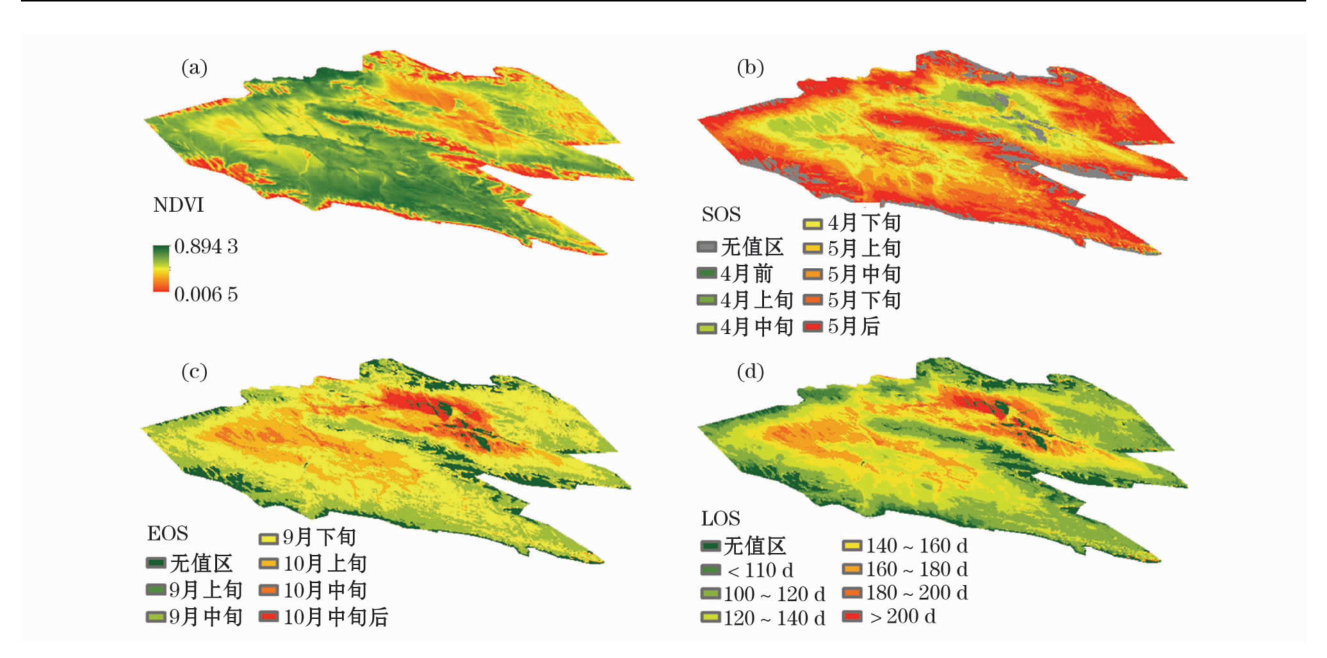


图 2　研究区 NDVI 及物候期的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of NDVI and phenological phases in the study area

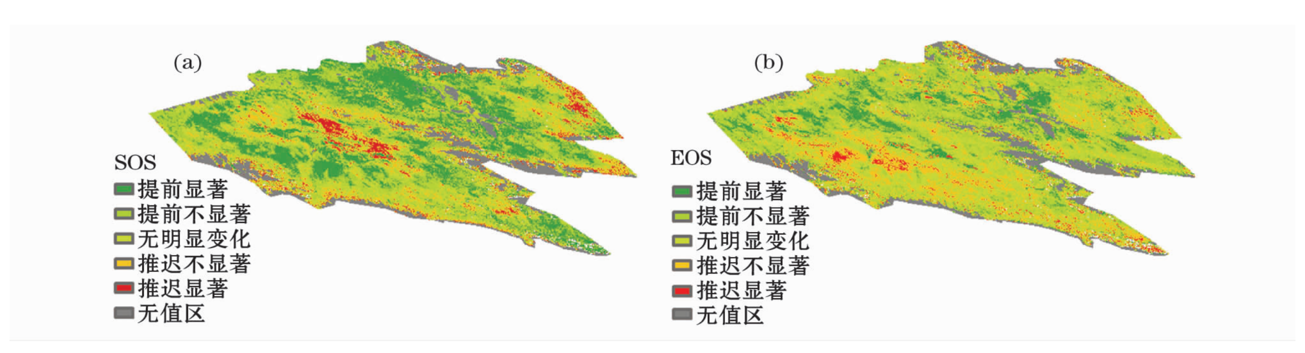


图 3　2001—2017 年物候年际变化趋势分布

Fig. 3　Change trend of phenological phases during the period from 2001 to 2017

11.6%。在研究区北部,EOS 呈推迟趋势,但推迟显著的区域较少,只占 3.2%。

由 2001—2017 年的返青期和枯黄期数据得到巴音布鲁克高山植被、草原、草甸和沼泽的返青期和枯黄期的时间变化特征。由图 4 可知,草原和沼泽,平均 SOS 开始最早,大约在 130 d 左右,草甸次之,在 140 d 左右,最晚的是高山植被,在 155 d 左右。2001—2017 年除高山植被的平均 SOS 无明显变化趋势外,其他植被都有提前的趋势,其中草原提前的趋势最为明显,为 0.33 $d \cdot a^{-1}$;其次为草甸,为 0.27 $d \cdot a^{-1}$;沼泽 0.21 $d \cdot a^{-1}$。4 种植被的平均 EOS 趋势也存在着明显差异,其中高山植被和草原有明显的提前,分别为 0.14 $d \cdot a^{-1}$和 0.22 $d \cdot a^{-1}$,草甸和沼泽的枯黄期无明显的趋势变化。总体来看,高山植被和草甸的物候变化过程相似,草原与沼泽的物候变化过程相似。

3.3　空间格局与海拔的关系

以高差 100 m 为间隔将研究区划分为不同的区域,对每个区域的草原、草甸、沼泽和高山植被的物候期进行统计,求取均值。如图 5a 所示,在海拔 2 300 ~ 2 600 m 的区域,草原、草甸和沼泽的返青期随着海拔的升高而提前,这可能是因为在海拔较低的盆地中心具有永久冻土层,气温较低,随着海拔的升高,气温逐渐升高,更利于植物返青。在 2 600 m 以上的区域,草原和草甸的返青期随着海拔的升高而推迟,高山植被的返青期基本不受海拔变化的影响。另外,该区域草原、草甸和高山植被的返青期差异随着海拔的升高而变小,且当海拔高于 3 400 m 时,海拔的变化对返青期的影响很小。枯黄期随高程变化如图 5b 所示,在 2 300 ~ 2 600 m 的区域,草原、草甸和沼泽的枯黄期随着海拔的升高而推迟,在 2 600 m以上的区域,草原和草甸的枯黄期随着海

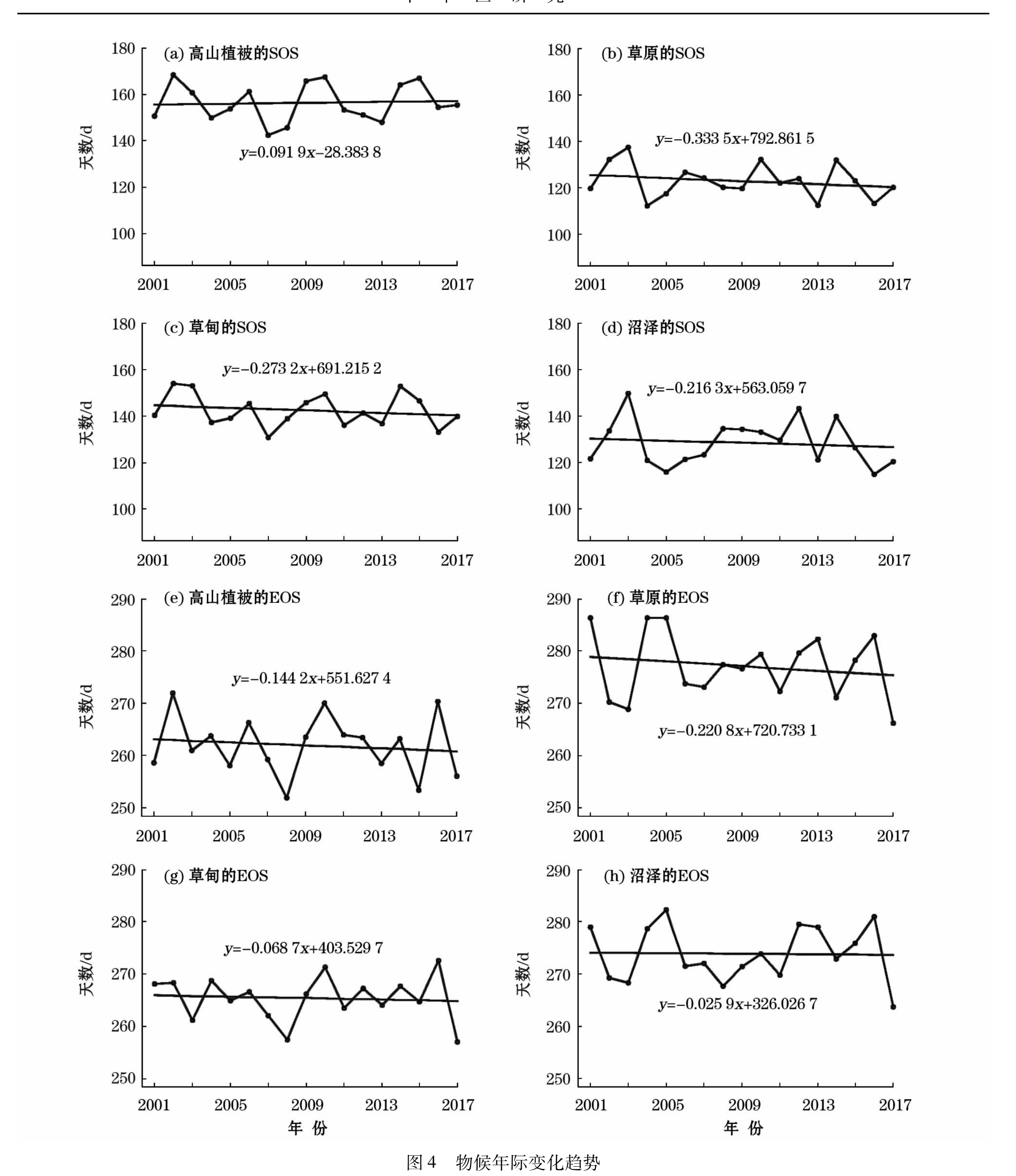


图 4 物候年际变化趋势

Fig. 4 Interannual variation trend of phenological phases

拔的升高而提前，高山植被的枯黄期随着海拔的升高无明显变化。草原、草甸和高山植被的枯黄期差异随着海拔的增加逐渐减小，且当海拔高于 3 100 m 时，海拔的变化对枯黄期的影响很小。

3.4 时空动态与气候因子的关系

相关研究表明，植被的物候期与前期的气候因子有着显著的相关关系，本研究区植被的返青期于 4 月上旬至 5 月下旬，枯黄期于 9 月上旬至 11 月上旬，因此，本研究选择前一年 11 月至当年 5 月的气温和降水分析气候因子与返青期的相关关系，选择当年 5—11 月的气温和降水分析气候因子与枯黄期的相关关系。

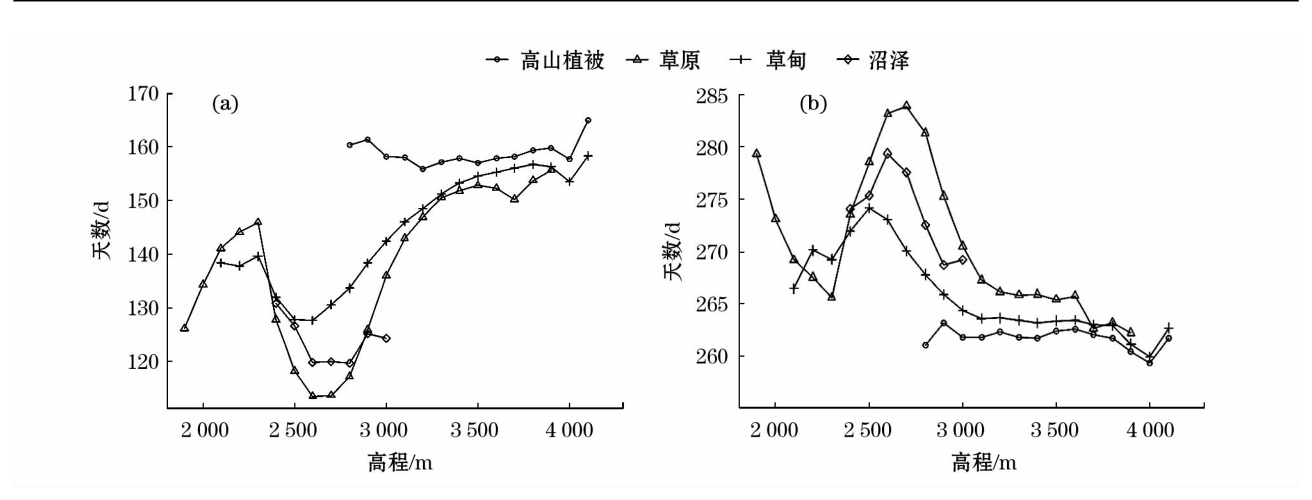


图 5　植物物候与海拔之间的关系

Fig. 5　Relationship between phenological phase and elevation

表 2　返青期与气候因子的相关分析

Tab. 2　Correlation analysis on the beginning date of growth season and climate factors

时间	高山植被		草原		草甸		沼泽	
	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水
前一年 11 月	-0.05	-0.43	0.15	-0.42	0.1	-0.63*	0.3	-0.58*
前一年 12 月	0.22	0.28	-0.02	-0.13	-0.15	0.08	0.3	-0.29
1 月	0.35	0.17	0.39	-0.25	0.48	-0.02	0.39	-0.6*
2 月	0.16	0.42	0.42	0.13	0.12	0.03	0.47	-0.25
3 月	-0.28	0.16	-0.31	0.11	-0.08	0.08	-0.04	0.02
4 月	-0.43	-0.22	-0.61*	0.16	-0.64*	-0.07	-0.43	-0.27
5 月	-0.77*	0.25	-0.4	0.01	-0.67*	0.08	-0.22	-0.27
前一年冬季	0.16	0.39	0.34	-0.09	0.24	0.03	0.46	-0.48
春季	-0.62*	0.16	-0.59*	0.11	-0.54*	0.06	-0.26	-0.1

注: * 为通过 0.05 可信度检验的显著因子。

表 3　枯黄期与气候因子的相关分析

Tab. 3　Correlation analysis on the ending date of growth season and climate factors

时间	高山植被		草原		草甸		沼泽	
	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水
5 月	-0.63*	0.18	0.2	0.05	-0.53	0.44	0.03	0.02
6 月	-0.43	0.62*	0.27	-0.31	-0.39	0.47	-0.02	-0.12
7 月	0.06	0.26	0.36	-0.17	0.19	0.21	0.21	-0.08
8 月	0.59*	0.26	-0.25	-0.17	0.39	0.21	-0.2	-0.08
9 月	0.09	-0.37	-0.06	0.17	-0.17	-0.47	0.2	0.11
10 月	-0.19	-0.09	-0.02	-0.34	0.06	-0.5	-0.14	-0.63*
11 月	-0.09*	0.43	-0.22	0.07	-0.42	0.37	-0.21	0.02
夏季	0.15	0.48	0.17	-0.27	0.12	0.38	-0.02	-0.12
秋季	0.03	-0.33	-0.19	0.13	-0.23	-0.49	-0.32	-0.03

注: * 为通过 0.05 可信度检验的显著因子。

由表 2 可知,研究区植被返青期与春季气温呈负相关,春季的气温升高会使植物物候期提前。高山植被、草原、草甸返青期受春季气温影响显著,沼泽返青期也明显受春季气温的影响,但不显著。高山植被的返青期主要受 5 月气温影响,草原和沼泽的返青期主要受 4 月气温影响,草甸的返青期主要受 4 月和 5 月的气温影响。另外,降水对植被的返青期有一定的影响,其中前一年 11 月份的降水有助于返青期提前,沼泽的返青期受冬季降水影响较为明显,尤其是前一年 11 月份和当年 1 月份的

降水。

植被的枯黄期与气候因子的相关性如表 3 所示,高山植被的枯黄期与 5 月的气温显著负相关,与 8 月的气温显著正相关,说明 5 月气温的升高会使高山植被的枯黄期提前,8 月气温的升高会使高山植被的枯黄期推迟。沼泽的枯黄期与 10 月的降水显著负相关,说明 10 月的降水会使沼泽的返青期提前。整体而言,研究区植被的枯黄期受气候因子影响不显著。

4 结 论

本文利用 MODIS NDVI 时间序列,提取了巴音布鲁克的植物物候信息,并探索了物候期的空间格局特征、时空变化特征及其与海拔和气候因子之间的关系,得到的结论如下:

(1) 研究区植被返青期主要在 4 月上旬至 5 月下旬,枯黄期主要在 9 月中旬至 10 月中旬,在平坦的盆地区域,草原、草甸、沼泽的物候期差异显著,在山地区域,高山植被、草甸、草原的物候期差异较小。

(2) 2001—2017 年,研究区植被返青期总体上呈提前趋势,除高山植被返青期无明显变化外,草原、草甸和沼泽的返青期有明显的提前趋势,其中草原提前幅度为 3.3 d·(10a)$^{-1}$,草甸提前幅度为 2.7 d·(10a)$^{-1}$,沼泽提前幅度为 2.1 d·(10a)$^{-1}$;植被的枯黄期在研究区北部呈提前趋势,在研究区南部呈推迟趋势,高山植被和草原枯黄期提前较为明显,分别为 1.4 d·(10a)$^{-1}$和 2.2 d·(10a)$^{-1}$,草甸和沼泽的枯黄期无明显变化。

(3) 除高山植被外,植被的返青期总体上随着海拔的升高而推迟,枯黄期总体上随着海拔的升高而提前,各生态系统间植物物候期的差异随着海拔的升高而减小。

(4) 研究区植被的返青期与春季气温呈显著的负相关,其中高山植被受 5 月份气温影响较大,草原和沼泽受 4 月份气温影响较大,草甸受 4 月和 5 月气温影响较大,同时前一年 11 月份的降水量也与研究区的植被有着明显的负相关性;枯黄期与气候因子总体上无显著相关性。

参考文献(References):

〔1〕 竺可桢,宛敏渭. 物候学〔M〕. 北京:科学出版社,1980.〔Zhu Kezhen, Wan Minwei. Phenology〔M〕. Beijing: Science Press, 1980.〕

〔2〕 江东,王乃斌,杨小唤,等. NDVI 曲线与农作物长势的时间互动规律〔J〕. 生态学报,2002,22(2):247－252.〔Jiang Dong, Wang Naibin, Yao Xiaohuan, et al. Principles of the Interaction between NDVI profile and the growing situation of crops〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2002,22(2):247－252.〕

〔3〕 辛景峰,宇振荣,Driessen P M. 利用 NOAA NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究〔J〕. 遥感学报,2001,5(6):442－447.〔Xin Jingfeng, Yu Zhenrong, Driessen P M. Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data〔J〕. Journal of Remote Sensing,2001,5(6):442－447.〕

〔4〕 Toshihiro S, Masayuki Y, Hitoshi T, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data〔J〕. Remote Sensing of Environment,2005,96(3－4):366－374.

〔5〕 常守志,王宗明,宋开山,等. 基于 NDVI 数据的三江平原农田物候监测〔J〕. 遥感技术与应用,2011,26(1):82－88.〔Chang Shouzhi, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. Monitoring cropland phenology in Sanjiang Plain based on NDVI data〔J〕. Remote Sensing Technology and Application,2011,26(1):82－88.〕

〔6〕 Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change〔J〕. Nature,2002,416(6 879):389－395.

〔7〕 Peñuelas J, Filella I, Comas P. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region〔J〕. Global Change Biology,2002,8(6):531－544.

〔8〕 买尔燕古丽·阿不都热合曼,艾里西尔·库尔班,阿迪力·阿不来提,等. 塔里木河下游胡杨物候特征观测〔J〕. 干旱区研究,2008,25(4):525－530.〔Maryamgul Abdurahman, Alishir Kurban, Adil Ablat, et al. Study on phenological characters of populus euphratica oliv in the lower reaches of the Tarim river〔J〕. Arid Zone Research,2008,25(4):525－530.〕

〔9〕 Reed B C, Brown J F. Trend analysis of time-series phenology derived from satellite data〔C〕//3rd International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images 2005, 2005: 166－168.

〔10〕 Xin Q C, Broich M, Zhu P, et al. Modeling grassland spring onset across the Western United States using climate variables and MODIS-derived phenology metrics〔J〕. Remote Sensing of Environment,2015,161:63－77.

〔11〕 于信芳,庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测〔J〕. 资源科学,2006,28(4):111－117.〔Yu Xinfang, Zhuang Dafang. Monitoring forest phenophases of northeast China based on MODIS NDVI data〔J〕. Resources Science,2006,28(4):111－117.〕

〔12〕 Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data〔J〕. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(8):1 824－1 832.

〔13〕 孔冬冬,张强,黄文琳,等. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响〔J〕. 地理学报,2017,72(1):39－52.〔Kong Dongdong, Zhang Qiang, Huang Wenlin, et al. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related me-

teorological factors[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):39－52.]

〔14〕 李强. 近 12 a 三江源地区植被物候对水热的响应[J]. 干旱区研究,2016,33(1):150－158. [Li Qiang. Phenology response of vegetation to hydrothermal condition in Three-river Source Region for the last 12 years[J]. Arid Zone Research,2016,33(1):150－158.]

〔15〕 俎佳星,杨健. 东北地区植被物候时序变化[J]. 生态学报,2016,36(7):2 015－2 023. [Zu Jiaxin,Yang Jian. Temporal variation of vegetation phenology in northeastern China[J]. Acta Geographica Sinica,2016,36(7):2 015－2 023.]

〔16〕 马勇刚,张弛,塔西甫拉提·特依拜. 中亚区域陆表植被物候时空变化特征分析[J]. 干旱区地理,2014,37(2):310－317. [Ma Yonggang,Zhang Chi,Tiyip Tashpolat. Spatial-temporal change of land surface phenology in Central Asia arid zone[J]. Arid Land Geography,2014,37(2):310－317.]

〔17〕 丁明军,张镱锂,孙晓敏,等. 近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析[J]. 科学通报,2012,57(33):3 185－3 194. [Ding Mingjun,Zhang Yili,Sun Xiaomin,et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009[J]. Chinese Science Bulletin,2012,57(33):3 185－3 194.]

〔18〕 侯美亭,胡伟,乔海龙,等. 偏最小二乘(PLS)回归方法在中国东部植被变化归因研究中的应用[J]. 自然资源学报,2015,30(3):409－422. [Hou Meiting,Hu Wei,Qiao Hailong,et al. Application of Partial Least Squares (PLS) regression method in attribution of vegetation change in eastern China[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(3):409－422.]

〔19〕 Shen M,Piao S,Dorji T,et al. Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau:Research status and challenges[J]. National Science Review,2016,2(4):454－467.

〔20〕 郑艺,张丽,周宇,等. 1982—2012 年全球干旱区植被变化及驱动因子分析[J]. 干旱区研究,2017,34(1):59－66. [Zheng Yi,Zhang Li,Zhou Yu,et al. Vegetation change and its during factors in Global Drylands during the period of 1982－2012[J]. Arid Zone Research,2017,34(1):59－66.]

〔21〕 邓兴耀,姚俊强,刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J]. 干旱区研究,2017,34(1):10－19. [Deng Xingyao,Yao Junqiang,Liu Zhihui. Spatiotemporal dynamic change of vegetation coverage in arid regions in Central Asia based on GIMMS NDVI[J]. Arid Zone Research,2017,34(1):10－19.]

〔22〕 杨雪梅,杨太保,刘海猛,等. 气候变暖背景下近 30 a 北半球植被变化研究综述[J]. 干旱区研究,2016,33(2):379－391. [Yang Xuemei,Yang Taibao,Liu Haimeng,et al. Vegetation variation in the North Hemisphere under climate warming in the last 30 years[J]. Arid Zone Research,2016,33(2):379－391.]

〔23〕 何宝忠,丁建丽,李焕,等. 新疆植被物候时空变化特征分析[J]. 生态学报,2018,38(6):2 139－2 155. [He Baozhong,Ding Jianli,Li Huan,et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):2 139－2 155.]

〔24〕 廖国潘,贾幼陵. 中国草地资源[M]. 北京:中国科学技术出版社,1996. [Liao Guopan,Jia Youling. Rangeland Resources of China[M]. Beijing:Chinese Science and Technology Press,1996.]

〔25〕 冯林. 论森林与草原的作用[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2006,27(1):127－131. [Feng Lin. Discussing about forest and grassland functions[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2006,27(1):127－131.]

〔26〕 苏大学. 天然草原在防治黄河上中游流域水土流失与土地荒漠化中的作用与地位[J]. 草地学报,2000,8(2):77－81. [Su Daxue. The effects and position of natural grassland on controlling soil erosion and desertification in watershed of the middle and upper reaches of Yellow river[J]. Acta Agrestia Sinica,2000,8(2):77－81.]

〔27〕 刘艳,舒红,李杨,等. 天山巴音布鲁克草原植被变化及其与气候因子的关系[J]. 气候变化研究进展,2006,2(4):173－176,209. [Liu Yan,Shu Hong,Li Yang,et al. Relationship between dynamic change of vegetation cover and climate factors in Bayinbuluk grassland of TianShan Mountains[J]. Advances in Climate Change Research,2006,2(4):173－176,209.]

〔28〕 Liu R G,Liu Y. Generation of new cloud masks from MODIS land surface reflectance products[J]. Remote Sensing of Environment,2013,133:21－37.

〔29〕 Chen J,Jönsson P,Tamura M,et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment,2004,91(3－4):332－344.

〔30〕 Lloyd D. A phenological classification of terrestrial vegetationcover using shortwave vegetation index imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,1990,11(12):2 269－2 279.

〔31〕 Balzter H,Gerard F,George C,et al. Coupling of vegetation growing season anomalies and fire activity with hemispheric and regional-scale climate patterns in central and east Siberia[J]. Journal of Climate,2007,20(15):3 713－3 729.

〔32〕 Reed B C,Brown J F,VanderZee D,et al. Measuring phenological variability from satellite imagery[J]. Journal of Vegetation Science,1994,5(5):703－714.

Spatiotemporal Variation of Vegetation Phenology and Its Driving Factors in the Bayanbuluk Region

GAO Qing[1,2], Alishir Kurban[1], XIAO Hao[1,2]

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Vegetation phenology is the most significant and intuitive indicator of climate change, and it is of great significance for understanding the interaction between climate change and vegetation phenology. The response and feedback of different ecosystems to climate change are different. It is of great significance for understanding the mechanism of phenological change to explore the relationship between spatiotemporal variation of vegetation phenology and its driving factors in various ecosystems under climate change. In this study, the Bayinbuluke with a variety of ecosystems was selected as the study area. The MODIS NDVI time-series data during the period of 1989 – 2011 were used to get the spatial distribution and spatiotemporal variation of vegetation phenology, and to analyze its relationship with elevation and climate factors. The results showed that: ① The beginning time of vegetation growth season was mainly from early April to mid-May, and the ending time was mainly from mid-September to mid-October; ② The beginning time of vegetation growth season in most regions of the study area became earlier during the period of 2001 – 2017, and that of the grassland, meadow and swamp became significantly earlier except for the alpine vegetation. The ending time of vegetation growth season became earlier in the north of the study area but was delayed in the south, and that of the alpine vegetation and grassland became significantly earlier; ③ On the whole, the beginning time of vegetation growth season was delayed but the ending time became earlier with the increase of elevation, and phenological difference among different ecosystems was decreased with the increase of elevation; ④ There was a negative correlation between the beginning time of vegetation growth season and the spring temperature. The beginning time of growth season of alpine vegetation was significantly affected by temperature in May, that of grassland and swamp by temperature in April, and that of meadow by temperature in April and May.

Key words: vegetation phenology; NDVI; spatial pattern; climate change; Bayanbuluk; Xinjiang